Vol.14, No.1, Spring 2025, pp.22-42 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

Research Article DOI: 10.22067/geoeh.2024.87025.1468 Open Access

Spatial Analysis of Soil Erosion and Habitat Quality Based on Land Use Patterns in Sistan Region, Eastern Iran

Mohammad Amin Izadipoor[a*], Reza Dahmardeh Behrooz[b†], Fatemeh Eynollahi Pir[c], Fatemeh Rajaei[d]

[a] MSc of Environmental Sciences, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran
[b] Associate Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran
[c] Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran
[d] Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ARTICLE INFO

Article History
Received: *25 February 2024*
Received in revised form *4 May 2024*
Accepted: *11 May 2024*
Available online: *21 March 2025*

KEYWORDS:

Soil erosion,
Habitat quality,
Land use, InVEST, GWR

ABSTRACT

Soil erosion is a significant environmental issue in terrestrial ecosystems that can impact habitat quality in a region. This study aimed to evaluate soil erosion and habitat quality in the Sistan region, eastern Iran, based on land use patterns. The InVEST model was used to assess soil erosion and habitat quality after collecting the necessary data. The relationship between soil erosion and habitat quality was analyzed using Spearman's correlation test and geographically weighted regression (GWR). The study found that the annual soil erosion in the region was 3.41 Mt (averaging 2.07 t ha^{-1}). Despite having higher quality, the western habitats showed a higher potential for soil erosion. The highest and lowest erosion rates were observed in rangelands (3.6 t ha^{-1} y^{-1}) and wetlands (0 t ha^{-1} y^{-1}), respectively. The highest and lowest habitat quality values were seen in rangelands and built-up areas, respectively. Spearman's test revealed a positive and significant correlation between habitat quality and soil erosion ($R = 0.71$, P-value < 0.01). GWR analysis also confirmed a significant spatial correlation between the two variables ($R^2 = 0.91$, P-value < 0.01). The spatial pattern of habitat quality and soil erosion in the study area was similar, with higher-quality habitats located in the western parts of the region, which naturally had a higher potential for erosion. This study provided valuable information on habitat quality and soil erosion and emphasized the importance of managers and planners adopting effective strategies to reduce soil erosion, particularly in high-quality habitats in the region.

*****.Corresponding authors:

Mohammad Amin Izadipoora Email: aminizadi7999@gmail.com

Dr.Reza Dahmardeh Behrooz Email: dahmardehbehrooz@uoz.ac.ir

How to cite this article: Izadipoor, M. A., Dahmardeh Behrooz, R., Eynollahi Pir, F., & Rajaei, F. (2025). Spatial Analysis of Soil Erosion and Habitat Quality Based on Land Use Patterns in Sistan Region, Eastern Iran. Journal of Geography and Environmental Hazards, 14(1),, pp22-42. https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.87025.1468

Extended Abstract

Introduction

Climate change, driven by global warming, poses an existential threat to both natural and human systems, necessitating accurate and reliable projections of future climate variations. While extensive research has examined the impacts of climate change on various subsystems and proposed adaptation and mitigation strategies, many studies have overlooked the inherent uncertainties in climate modeling. Limiting analyses to selected scenarios from Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs) and neglecting uncertainty analysis reduces the credibility and certainty of the final results. Indeed, uncertainties arising from structural and parametric diversity in models, downscaling processes, and impact assessment models require rigorous investigation and quantification.

A comprehensive assessment of climate change impacts requires the identification and analysis of three primary categories of uncertainty:

1. Uncertainties associated with the structure and parameters of AOGCMs;
2. Uncertainties arising from statistical and dynamical downscaling methods at regional scales; and
3. Parametric and structural uncertainties in impact assessment models.

AOGCMs, due to their diversity in structure and parameters, produce varying outputs for climatic variables, representing a significant source of uncertainty in climate projections. Incorporating uncertainties into climate change impact assessments leads to various plausible future scenarios that can inform decision-making and adaptation planning. Given computational and data limitations, a comprehensive examination of all uncertainty sources in every study is infeasible. However, studies have shown that certain uncertainties, such as those related to downscaling methods, significantly impact the final results and must be considered in assessing climate change impacts on river flows. Employing multi-model ensemble approaches and ensemble prediction methods to quantify and reduce uncertainties arising from AOGCMs is an effective strategy adopted in this research.

Material and Method

The Qarasu watershed, located in western Iran within Kermanshah province, served as the focal point of this study. Observational data spanning 1976–2005 were obtained from the Kermanshah synoptic station, courtesy of the Iran Meteorological Organization. Complementing this, downscaled data from 21 Global Circulation Models (GCMs) were acquired from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) dataset. This dataset encompassed both the historical (1976–2005) and future (2020–2049) periods under the Representative Concentration Pathway 4.5 (RCP4.5) scenario, selected for its intermediate climate change trajectory.

Following meticulous data validation and preprocessing, the uncertainty inherent in the GCMs was rigorously assessed. To evaluate GCM performance, the coefficient of determination (R^2) and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) were computed, facilitating a comparative analysis between simulated temperature and precipitation under RCP4.5 and observed values from the Kermanshah synoptic station.

To address and mitigate uncertainties in climate projections, this research employed a suite of ensemble methods, including ensemble prediction (EP), multi-model ensembles (MEP), and weighted multi-model ensembles (MEPWi), rather than relying solely on individual model

outputs. The fundamental premise underpinning these methods is that models demonstrating superior skill in replicating historical climate patterns are anticipated to maintain their relative accuracy in future projections, thereby identifying them as optimal candidates. Consequently, the weight assigned to each model within the ensemble is directly proportional to its historical performance. Finally, the accuracy of the model simulations relative to observational data was evaluated using R^2 and NSE.

Results and Discussion

The findings indicated that MRI-CGCM3, MPI-ESM-LR, BNU-ESM, ACCESS1-0, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, and MPI-ESM-MR exhibited robust performance in simulating monthly precipitation patterns. Concurrently, ACCESS1-0, CNRM-CM5, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, and BNU-ESM demonstrated heightened accuracy in replicating temperature regimes. Notably, MRI-CGCM3, MPI-ESM-MR, and MIROC-ESM-CHEM were assigned the highest weights and exhibited the lowest uncertainty in their simulations of monthly precipitation, maximum temperature, and minimum temperature, signifying their superior fidelity and minimal deviation.

Analysis of statistical metrics from the ensemble methods revealed that the multi-model ensemble prediction (MEP) approach, characterized by an R^2 of 0.95 and NSE of 0.92, provided the most congruent estimates compared to baseline data from the Kermanshah synoptic station. Consequently, the MEP method was adjudicated as the optimal ensemble prediction paradigm for GCMs in this study.

Scrutiny of mean monthly and annual fluctuations under the MEP framework projected that:

- Monthly and annual precipitation are anticipated to change by 1.9% and 22.7%, respectively, in the future period.
- Mean monthly and annual temperature increments are projected to be 1.89°C and 1.88°C, respectively.

Conclusions

This study examined and compared various climate modeling methodologies to mitigate uncertainty in climate projections. Our findings reveal that no single climate model accurately predicts all climatic parameters within a given region. Optimal projections for temperature and precipitation necessitate the utilization of multiple models, underscoring the importance of multi-model ensemble techniques. We evaluated three ensemble methods: Model Ensemble with Weighting (MEPWi), Model Ensemble Projection (MEP), and Ensemble Prediction (EP).

The results indicated that projected values from these methods were relatively consistent, with minimal discernible differences. However, the MEP method yielded the most precise estimates for temperature and precipitation, establishing it as the superior technique for reducing uncertainty in climate projections. This research emphasizes that leveraging diverse climate models significantly enhances projection accuracy and reduces uncertainties. Relying solely on a single GCM is insufficient for formulating robust strategies to mitigate climate change impacts. Our results align with prior research demonstrating the efficacy of multi-model ensembles in improving predictive accuracy.

In summary, this study demonstrates that applying climate model ensemble techniques, particularly the MEP method, substantially improves the reliability of climate projections. This enhanced precision is crucial for enabling policymakers and planners to make informed decisions aimed at mitigating climate change impacts. Future studies could explore the performance of these ensemble methods under different climate scenarios and in other regions.

ISSN (Online):2383-3076 ISSN (Print):2322-1682 جلد ۱۴، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، صص ۴۲-۲۲

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.87025.1468 دسترسی آزاد

تحلیل مکانی فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها بر مبنای الگوی کاربری اراضی در منطقه سیستان

محمدامین ایزدی‌پور[*1]، رضا دهمرده بهروز[*2]، فاطمه عین‌اللهی پیر[3]، فاطمه رجائی[4]

[*]دانشجوی کارشناسی ارشد محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران
[2] دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران
[3] استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران
[4] استادیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

کلمات کلیدی:

فرسایش خاک
کیفیت زیستگاه‌ها
کاربری اراضی
اینوست
رگرسیون وزنی مکانی

چکیده

فرسایش خاک یکی از جدی‌ترین مشکلات محیطزیستی در اکوسیستم‌های خشکی است که می‌تواند کیفیت زیستگاه‌های یک منطقه را تحت تأثیر قرار دهد. این مطالعه با هدف ارزیابی فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌های سیستان بر مبنای الگوی کاربری ارضی انجام گردید. پس از تهیه داده‌های مورد نیاز، مدلسازی فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها با استفاده از مدل اینوست(InVEST) و ارتباط میان آنها بر اساس آزمون همبستگی اسپیرمن و رگرسیون وزنی مکانی (GWR) صورت پذیرفت. نتایج نشان داد فرسایش سالانه خاک در منطقه در مجموع ۳/۴۱ میلیون تن (بطور میانگین معادل ۲/۰۷ تن در هکتار) بود. زیستگاه‌های بخش غربی منطقه با وجود داشتن کیفیت بیشتر از پتانسیل فرسایش خاک بالاتری نیز برخوردار بودند. بیشترین و کمترین میزان فرسایش به ترتیب در مراتع (۳/۶ تن در هکتار) و تالاب (۰ تن در هکتار) و بالاترین و کمترین میزان کیفیت زیستگاه‌ها به ترتیب در مراتع و ساخته‌شده‌ها مشاهده گردید. آزمون اسپیرمن رابطه مثبت و معنادار کیفیت زیستگاه‌ها با فرسایش خاک را نشان داد ($R=0.71$, $P\text{-value}<0.01$). نتایج GWR نیز همبستگی مکانی معنادار بین آنها را تأیید کرد ($R^2=0.91$, $P\text{-value}<0.01$). الگوی مکانی کیفیت زیستگاه‌ها و

[*] نویسندگان مسئول: محمدامین ایزدی‌پور
دکتر رضا دهمرده بهروز

Email: aminizadi7999@gmail.com
Email: dahmardehbehrooz@uoz.ac.ir

فرسایش خاک در منطقه مطالعاتی تقریباً مشابه است بطوریکه زیستگاه‌های با کیفیت بالاتر در بخش غربی منطقه واقع شده‌اند، ضمن آنکه همین بخش‌ها بطور طبیعی از پتانسیل فرسایش بیشتری برخوردار هستند. نتایج این مطالعه علاوه بر ارائه اطلاعات مفید در مورد کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک، ضرورت توجه مدیران و برنامه‌ریزان را برای اتخاذ راهبردهای مناسب به منظور کاهش فرسایش خاک بخصوص در زیستگاه‌های با کیفیت مطلوبتر در منطقه مشخص می‌سازد.

مقدمه

فرسایش خاک یکی از جدی‌ترین مشکلات محیطزیستی حال حاضر در جهان است که تحت تأثیر عوامل طبیعی مانند آب و هوا، شکل زمین و ویژگی‌های خاک و عوامل انسانی مانند تغییرات کاربری اراضی اتفاق می‌افتد(Obiahu & Elias, 2020; Dou et al., 2022; Gomiero, 2016). این فرآیند به طور مستقیم بر توسعه، بهره‌برداری و حفاظت از منابع آب و خاک یک منطقه اثرگذار است و در نهایت منجر به تخریب بهره‌وری زمین می‌شود(Qiao et al., 2023).

برای ارزیابی فرسایش خاک مدل‌ها و ابزارهای مختلفی از جمله پروژه پیش‌بینی فرسایش آبی(WEPP)[۱]، ابزار ارزیابی خاک و آب(SWAT)[۲]، معادله جهانی تلفات خاک(USLE)[۳]، معادله جهانی اصلاح شده تلفات خاک(RUSLE)[۴] و مدل نسبت تحویل رسوب اینوست(SDR-InVEST)[۵] توسعه یافته‌اند(Ahmadi Mirghaed, Souri, Mohammadzadeh, Salmanmahiny & Mirkarimi, 2018; Li & Shi, 2024). مدل RUSLE یک مدل تجربی پیش‌بینی فرسایش خاک است که کاربرد و قابلیت اطمینان آن در مطالعات قبلی در دهه‌های گذشته تأیید شده است(Alewell, Borrelli, Meusburger & Panagos, 2019). در دهه اخیر، مدل SDR-InVEST که مبتنی بر RUSLE است، به ابزاری مهم برای ارزیابی نگهداشت و تولید رسوب و فرسایش خاک، در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی در سطح بین‌المللی تبدیل شده است(Qiao et al., 2023; Li & Shi, 2024). درخشان بابائی و همکاران(Derakhshan Babaei, Nosrati, Mirghaed & Egli, 2021) فرسایش خاک در حوضه آبخیز کن در استان تهران را با استفاده از مدل SDR-InVEST حدود ۷ تن در هکتار در سال برآورد کردند. همچنین آنسیبی و همکاران(Aneseyee, Noszczyk, Soromessa & Elias, 2020b) اثر تغییرات کاربری بر فرسایش خاک را با استفاده از مدل SDR-InVEST در حوضه آبخیز ونیکه در اتیوپی ارزیابی کردند. آنها دریافتند که مزارع زیر کشت نسبت به علفزار، بوته زار، جنگل و اراضی بایر بالاترین نرخ فرسایش خاک را داشتند که از ۱۰/۰۲ تن در هکتار در سال ۱۹۸۸ به ۴۳/۴۸ تن در هکتار

1 Water Erosion Prediction Project
2 Soil and Water Assessment Tool
3 Universal Soil Loss Equation
4 Revised Universal Soil Loss Equation
5 Sediment Delivery Ratio - Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs

در سال ۲۰۱۸ افزایش یافت. در مطالعه دیگری تووبال و همکاران Toubal, Achite, Ouillon & Dehni, (2018) میزان از دست دادن خاک در حوضه وادی صحوات در الجزایر را با استفاده از مدل RUSLE بین صفر تا ۲۵۵ تن در هکتار در سال برآورد کردند. زارع و همکاران(Zare, Panagopoulos & Loures, 2017) نیز تأثیر تغییر کاربری اراضی بر میزان فرسایش خاک در حوضه کسیلیان ایران را ارزیابی کردند. آنها نشان دادند که تغییر کاربری اراضی از جنگل به سکونتگاه‌ها مهم‌ترین عامل فرسایش ناشی از تغییر کاربری زمین در منطقه مورد مطالعه‌شان بوده است.

از جمله مهمترین اثرات فرسایش خاک، آسیب رساندن به اکولوژی و کیفیت زیستگاه‌های یک منطقه است (Qiao et al., 2023). کیفیت زیستگاه یکی از مهمترین خدمات اکوسیستمی حمایتی است که پتانسیل یک اکوسیستم را در ایجاد شرایط مناسب برای بقاء و پایداری گونه‌ها و جمعیت‌ها بیان می‌کند و تا حدودی به عنوان شاخصی برای انعکاس تنوع زیستی منطقه‌ای در نظر گرفته می‌شود(Sharp et al., 2015). در دهه‌های اخیر، افزایش فعالیت‌های انسانی موجب تکه‌تکه‌شدن زیستگاه، انقراض گونه‌های انبوه و تهاجم گونه‌های بیگانه شده است که منجر به تخریب کیفیت زیستگاه و کاهش تنوع زیستی شده است. تغییرات کاربری زمین منجر به تفاوت‌های قابل‌توجهی در ساختار داخلی، فرآیندها و عملکرد اکوسیستم‌ها می‌شود که علت اصلی تخریب و از دست دادن کیفیت زیستگاه است. بنابراین، بررسی کیفیت زیستگاه و تغییرات آن پیشنیازی برای امنیت اکوسیستم‌های منطقه‌ای است(Lei et al., 2022).

با پیشرفت علم محیط زیست، مدل‌های ارزیابی زیستگاه‌ها از جمله مدل‌های کیفیت زیستگاه اینوست (HQ-InVEST)[1]، شاخص تناسب زیستگاه (HSI)[2]، ارزش‌های اجتماعی برای خدمات اکوسیستمی (SolVES)[3] و مدل‌های یکپارچه خدمات اکوسیستمی نیز توسعه داده شده‌اند(Wei et al., 2022; Lei et al., 2022).

در این بین، مدل کیفیت زیستگاه اینوست از جمله پرکاربردترین و محبوب‌ترین مدل به شمار می‌رود چرا که روشی ساده برای ارزیابی کیفیت زیستگاه در مکان‌هایی با داده‌های محدود و نمونه‌برداری نشده، ارائه می‌دهد(Wei et al., 2022). بعلاوه، از تهدیدات زیستگاه و کاربری زمین برای تخمین کیفیت زیستگاه استفاده می‌کند که کارآمدتر و دقیق‌تر است و مزایای زیادی در محاسبه کیفیت زیستگاه در بازه‌های طولانی مدت دارد (Gong, Xie, Cao, Huang & Li, 2019). تاکنون، این مدل برای مطالعه کیفیت زیستگاه در مقیاس‌ها و مکان‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. پو و همکاران(Pu, Shen, Liu & Wen, 2024) کیفیت زیستگاه‌های حوضه دریاچه تایهو در چین را با استفاده از مدل اینوست ارزیابی کردند. آنها اذعان داشتند که با تغییر کاربری در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در منطقه مورد مطالعه‌شان، کیفیت زیستگاه‌های آن کاهش یافته است(Ahmadi Mirghaed & Souri, 2022). زیستگاه‌های حوضه آبخیز رودخانه تلوک در استان خوزستان را با استفاده از مدل کیفیت زیستگاه اینوست مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نشان دادند که

1 Habitat Quality of InVEST
2 Habitat Suitability Index
3 Social Values for Ecosystem Services

کیفیت زیستگاه‌های واقع در شمال و شرق منطقه نسبت به دیگر بخش‌ها بسیار بیشتر است. بعلاوه، زیستگاه‌های جنگلی دارای کیفیت بالاتری نسبت به دیگر زیستگاه‌های حوضه دارد. در مطالعه دیگری آنسیی و همکاران(Aneseyee, Elias, Soromessa & Feyisa, 2020a) از مدل کیفیت زیستگاه اینوست برای تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی - زمانی کیفیت زیستگاه در انواع مختلف کاربری در حوضه وینک در اتیوپی استفاده نمودند.

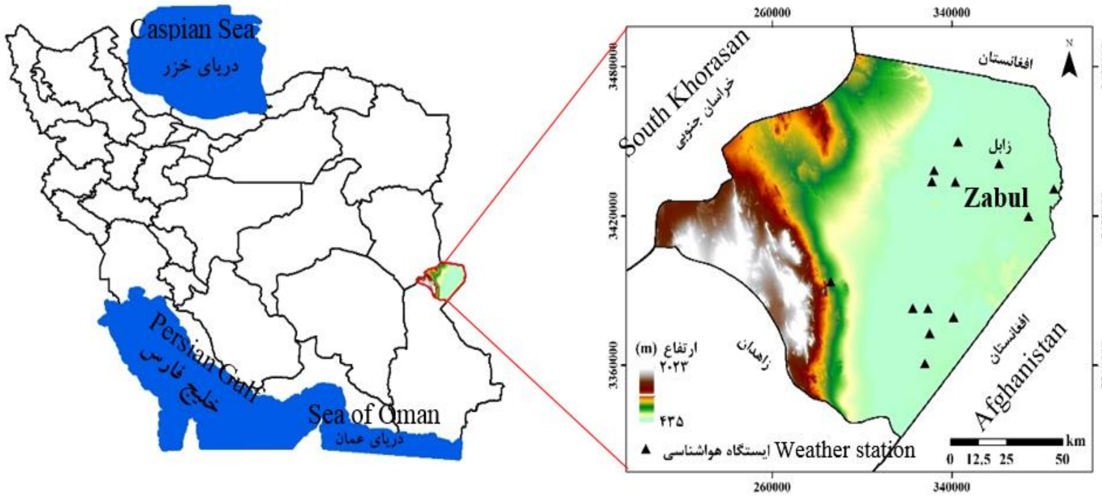
وو و همکاران(Wu, Sun & Fan, 2021) نیز رابطه تغییرات مکانی - زمانی کیفیت زیستگاه‌های منطقه خلیج گوانگدونگ - هنگ کنگ در ماکائو را با استفاده از مدل اینوست در بازه زمانی ۱۹۹۵-۲۰۱۵ مورد مطالعه قرار دادند. نعمت‌الهی و همکاران(Nematollahi, Fakheran, Kienast, Pourmanafi & Jafari, 2021) کیفیت زیستگاه گونه‌های قوچ و میش اصفهان، پلنگ و خرس قهوه‌ای را با استفاده از مدل اینوست در استان چهار محال و بختیاری مدل‌سازی و ارتباط آن را با اثرات بوم‌شناختی شبکه جاده‌ای ارزیابی کردند. آنها با استفاده از نقشه‌های به‌دست آمده، درجه آسیب‌پذیری مناطق حفاظت‌شده را تعیین و راهکارهایی در راستای کاهش اثرات منفی شبکه جاده‌ای ارائه دادند.

مطالعات مختلفی در مورد کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک انجام شده است. با این وجود، ارتباط و برهمکنشی بین آنها بویژه در مناطق با اقلیم خشک بندرت مورد توجه قرار گرفته است. کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک هر دو تحت تأثیر عوامل مشترک بویژه تغییرات کاربری اراضی قرار می‌گیرند. علاوه بر این، یک رابطه متقابل تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بین آنها وجود دارد. به همین منظور، این مطالعه با هدف ارزیابی ارتباط بین کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک بر مبنای الگوی کاربری اراضی در سیستان انجام شد. سیستان یک منطقه استراتژیک و مهم در شرق کشور است که دارای اقلیم گرم و خشک می‌باشد. تداوم خشکسالی‌های متعدد و تغییرات کاربری اراضی در دهه‌های اخیر، باعث تشدید فرسایش خاک در این منطقه شده است و کیفیت زیستگاه‌های آن را نیز تحت تأثیر قرار داده است. با وجود چنین مسائلی، تاکنون تحقیقی در خصوص ارزیابی کیفیت زیستگاه‌ها در ارتباط با فرسایش خاک در این ناحیه صورت نگرفته است. ارزیابی کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک در این منطقه می‌تواند اطلاعات مفیدی درباره شرایط محیطزیستی منطقه ارائه دهد که برای اتخاذ راهبردهای مدیریتی محیطزیست منطقه حائز اهمیت است. بر این اساس، این تحقیق با توجه به اهداف زیر انجام شد: (الف) مدلسازی فرسایش خاک بر مبنای الگوی کاربری اراضی در سیستان با استفاده از مدل نسبت تحویل رسوب اینوست، (ب) ارزیابی کیفیت زیستگاه‌های منطقه مطالعاتی بر مبنای الگوی کاربری اراضی و با استفاده از مدل کیفیت زیستگاه اینوست و (ج) ارزیابی ارتباط و الگوی مکانی بین فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها در منطقه مطالعاتی.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

سیستان با مساحتی حدود ۱۶۴۵۹ کیلومترمربع واقع شده در محدوده مختصات جغرافیایی "۱۶ '۵۶ °۵۹ تا "۱۹ '۵۰ °۶۱ طول شرقی و "۱۷ '۶ °۳۰ تا "۸ '۲۹ °۳۱ عرض شمالی در خاور ایران، شهرستان‌های زابل، زهک، هامون، هیرمند و نیمروز را شامل می‌شود(شکل ۱). بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، این منطقه دارای اقلیم گرم و خشک است و میانگین دما و بارش سالیانه آن به ترتیب ۲۲ درجه سانتیگراد و ۶۶ میلیمتر می‌باشد. متوسط ارتفاع از سطح دریا و شیب سرزمین در منطقه به ترتیب ۶۷۹ متر و ۶ درصد است. مناطق دشتی و هموار بخش‌های خاوری و ارتفاعات بلند بخش‌های غربی منطقه را در بر گرفته‌اند. کاربری‌های غالب در منطقه شامل کشاورزی و مرتع می‌باشد. وجود تالاب هامون و پناهگاه حیات وحش هامون در این منطقه اهمیت اکولوژیک زیستگاه‌های آن را برای گونه‌های جانوری (شامل ۳۰ گونه پستاندار، ۱۸۳ گونه پرنده، ۴۴ گونه خزنده، ۷ گونه دوزیست و ۲۲ گونه ماهی) و گیاهان مختلف (شامل گیاهان ماسه‌دوست، شورپسند و مقاوم به خشکی) محرز ساخته است(Department of Environment Islamic Republic of Iran, 2023). با توجه به شرایط خشکسالی و وجود بادهای ۱۲۰ روزه در این منطقه، احتمال افزایش فرسایش خاک، دور از انتظار نیست. تداوم خشکسالی‌های متعدد و تغییرات کاربری اراضی در دهه‌های اخیر، موجب افت سطح آبهای زیرزمینی و خشک شدن قنات‌های موجود در منطقه شده است که در نتیجه آن فرسایش خاک تشدید و کیفیت زیستگاه‌های منطقه نیز تحت تأثیر قرار گرفته است. شکل ۲ نمونه‌هایی از وضعیت محیط‌زیست کنونی منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سیستان در ایران

Fig.1. Geographical location of Sistan in Iran



شکل ۲- نمونه‌هایی از شرایط محیطزیستی منطقه سیستان

Fig.2. Examples of environmental conditions in the Sistan region

جمع‌آوری و تهیه داده‌ها

در این مطالعه داده‌های مختلفی شامل مدل رقومی ارتفاعی، کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک، داده‌های اقلیمی و پوشش گیاهی تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های موردنیاز بر اساس پردازش تصاویر لندست در سامانه گوگل ارث انجین، گزارشات موجود و بازدیدهای میدانی تهیه شدند. مدل رقومی ارتفاعی از داده‌های SRTM[1] و ویژگی‌های بافت و ماده آلی خاک از داده‌های جهانی خاک استخراج شدند. نقشه کاربری اراضی بر اساس تصاویر چندطیفی سنجنده OLI[2] ماهواره لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۲ و با استفاده از روش جنگل تصادفی پردازش و تهیه گردید. داده‌های میانگین بارندگی ماهانه و سالانه منطقه بر اساس آمار ۱۳ ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه (ایستگاه‌های هواشناسی زابل، زهک، بنجار، ادیمی، ژاله‌ای، جزینک، چرک، کوه خواجه، محمدشاه کرم، محمدآباد بولایی، شهرگ گلخانی، شهر سوخته و تیمورآباد) و داده‌های اقلیمی TerraClimate نقشه‌سازی شدند. شاخص نرمال شده تفاوت گیاهی (NDVI[3]) نیز بر اساس باندهای قرمز و مادون قرمز ماهواره لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۲ و با استفاده از معادله ۱ در سامانه گوگل ارث انجین محاسبه گردید(Rouse, Haas, Schell & Deering, 1974).

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad \text{(۱)رابطه}$$

1 Shuttle Radar Topography Mission
2 Operational Land Imager
3 Normalized Difference Vegetation Index

مدلسازی فرسایش خاک

فرسایش خاک در منطقه مطالعاتی با استفاده از مدل نسبت تحویل رسوب اینوست (SDR-InVEST) ارزیابی گردید. مبنای این مدل معادله اصلاح شده تلفات خاک(RUSLE) مطابق با فرمول ۲ است که ورودی‌های آن شامل مدل رقومی ارتفاعی، قدرت فرسایندگی باران، فاکتورهای پوشش گیاهی و مدیریتی سرزمین، میزان فرسایش‌پذیری خاک و نقشه کاربری اراضی است(Sharp et al., 2015).

$$E = R \times K \times LS \times C \times P$$ رابطه(۲)

که در آن E، R، K، LS، C و P به ترتیب میزان فرسایش خاک ($t\ y^{-1}$)، فرسایندگی باران($MJ\ mm\ (ha\ hr)^{-1}$)، فرسایش‌پذیری خاک ($t\ ha\ hr\ (MJ\ ha\ mm)^{-1}$)، فاکتور طول و امتداد شیب، عامل پوشش گیاهی و فاکتور مدیریتی سرزمین را نشان می‌دهند. در این مطالعه، فاکتور R بر اساس شاخص فورنیه مطابق با معادلات ۳ و ۴ محاسبه گردید. فاکتور K بر اساس ویژگی‌های خاک و معادله ۵ و فاکتور C بر مبنای معادله ۶ سنجیده شدند. فاکتور P نیز بر اساس نقشه‌های کاربری ارضی و شیب و مطابق با جدول ۱ بدست آمد. با معرفی مدل رقومی ارتفاعی منطقه به مدل SDR-InVEST، فاکتور LS نقشه‌سازی می‌شود (Sharp et al., 2015; Derakhshan Babaei et al., 2021).

$$F = \sum_{i=1}^{12} p_i^2 / Pr$$ رابطه(۳)

$$R = \begin{cases} (0.07397 F^{1.847}) & if \quad F < 55\ mm \\ (95.77 - 6.081F + 0.477F^2) & if \quad F \geq 55\ mm \end{cases}$$ رابطه(۴)

که در آن F، p_i و Pr به ترتیب شاخص فورنیه، میانگین بارندگی ماهانه و میانگین بارندگی سالانه را نشان می‌دهند(Renard & Freimund, 1994).

$$K = \left(0.2 + 0.3 exp\left[-0.0256 SA \frac{(1-SI)}{100}\right]\right) \left(\frac{SI}{CL+SI}\right)^{0.3} \left(1.0 - \frac{0.25 OC}{OC + \exp\left(3.72 + 2.9 OC\right)}\right) \left(1.0 - \frac{0.7\left(1-\frac{SA}{100}\right)}{\left(1-\frac{SA}{100}\right) + \exp\left(-5.51 + 22.9\left(1-\frac{SA}{100}\right)\right)}\right)$$ رابطه(۵)

که در آن SA، SI، CL و OC به ترتیب درصد شن، سیلت، رس و کربن آلی خاک را بیان می‌کنند(Sun, Shao, Liu & Zhai, 2014).

رابطه(۶) $$C = exp[-\alpha(NDVI/\beta - NDVI)]$$

α و β ضرایب ثابت به ترتیب برابر ۲ و ۱ هستند(Van der Knijff, Jones & Montanarella, 2000).

جدول ۱- ارزش فاکتور P بر اساس کلاس‌های شیب

Table 1- P-factor value based on slope classes(Smith & Wischmeier, 1962)

کلاس شیب Slope class	<3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-20	20-25	>25
فاکتور p factor P	0/6	0/5	/0/5	0/6	0/7	0/8	0/9	1

ارزیابی کیفیت زیستگاه‌ها

مدل کیفیت زیستگاه اینوست (HQ-InVEST) به منظور ارزیابی کیفیت زیستگاه‌های منطقه مطالعاتی مدنظر قرار گرفت. این مدل کیفیت زیستگاهی را با توجه به معادله ۷ برآورد می‌کند و ورودی‌های آن شامل نقشه کاربری اراضی، زیستگاه‌ها و عوامل تهدید است. در این راستا، پنج عامل باید مورد توجه قرار گیرد که شامل فاصله اثرگذاری و روند تهدید، ارزش زیستگاهی، اهمیت منابع تهدید، حساسیت زیستگاه‌ها به منابع تهدید و سطح اقدامات حفاظتی می‌باشد. فاصله اثرگذاری منبع تهدید بر یک زیستگاه خاص بر حسب کیلومتر درنظر گرفته می‌شود و تغییرپذیری آن در فضا بصورت نمایی یا خطی تعریف می‌شود. سه عامل ارزش زیستگاهی، اهمیت منابع تهدید و حساسیت زیستگاه‌ها به منابع تهدید با توجه به شرایط منطقه و بر اساس نظرات کارشناسی و منابع علمی در مقیاس صفر تا ۱ ارزشگذاری می‌شوند. در این مطالعه عوامل مذکور مطابق با جدول ۲ تعریف شدند. سطح اقدامات حفاظتی نیز با توجه به نوع مدیریت و وجود مناطق حفاظت شده در منطقه در مقیاس صفر تا ۱ ارزشگذاری می‌شود و به صورت یک لایه وکتوری به مدل معرفی می‌گردد(Sharp et al., 2015; Ahmadi Mirghaed & Souri, 2022).

$$Q_{xj} = H_j\left(1 - (D_{xj}^z / D_{xj}^z + k^z)\right)$$ رابطه (۷)

Q_{xj}، H_j و D_{xj} به ترتیب بیانگر کیفیت زیستگاه، ارزش مطلوبیت زیستگاهی و سطح تخریب کلی در پیکسل x با کاربری j هستند. z ضریبی برابر با ۲/۵ است. K ثابت نیم اشباع است که کالیبراسیون مدل بر مبنای آن انجام می‌شود. K به طور پیش فرض برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود و با یکبار اجرای مدل، نصف بیشترین مقدار ارزش تخریب برای آن منظور می‌شود(Sharp et al., 2015; He, Huang & Li, 2017).

جدول ۲ – ارزش‌های تعیین شده برای زیستگاه‌ها، منابع تهدید و حساسیت زیستگاه‌ها به منابع تهدید

Table 2- Values assigned to habitats, sources of threat, and sensitivity of habitats to sources of threat

وزن تهدید Threat weight	روند تغییرات تهدید Threat trends	حداکثر فاصله اثرگذاری تهدید The maximum effective (km) distance of the threat	زیستگاه‌ها Habitat: تالاب Wetlands	مرتع Meadows	اراضی بایر Barren lands	شوره‌زار Salt marshes	کشاورزی Agriculture	ساخته‌شده Made	منابع تهدید Sources of threat
0/9	خطی Linear	6	0/8	0/6	0/5	0/1	0/1	0	ساخته شده Made
0/7	خطی Linear	6	0/9	0/7	0/5	0/1	0/5	0	کشاورزی Agriculture
0/9	خطی Linear	6	0/7	0/8	0/6	0/6	0/5	0	جاده و راه Road and path
			0/9	0/7	0/5	0/3	0/3	0/1	ارزش زیستگاهی Habitat value

تحلیل‌های آماری

منطقه مطالعاتی با استفاده از ماژول شبکه‌بندی[۱] در نرم افزار ArcGIS 10.7 زون‌بندی و میانگین فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها برای هر زون محاسبه گردید. ارتباط و همبستگی بین فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها با استفاده از آزمون همبستگی اسپیرمن در محیط SPSS و رگرسیون وزنی مکانی[۲] (GWR) در نرم افزار ArcGIS 10.7 در سطح زون‌های مورد نظر مورد سنجش قرار گرفت.

نتایج و بحث

نقشه‌های فرسایندگی باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول و امتداد شیب (LS)، عامل پوشش گیاهی (C) و فاکتور مدیریتی (P) در شکل ۳ نشان داده شده است. ارزش‌های میانگین، حداقل و حداکثر برای فاکتور R ($MJ\ mm\ (ha\ hr)^{-1}$) به ترتیب ۷/۹۹، ۴/۸ و ۱۲/۸ برآورد گردید. به همین منوال، برای فاکتور K ($t\ ha\ hr\ (MJ\ ha\ mm)^{-1}$) به ترتیب ۰/۱۵، ۰/۱۲ و ۰/۱۷، برای فاکتور LS به ترتیب ۳/۲، ۰/۰۳ و

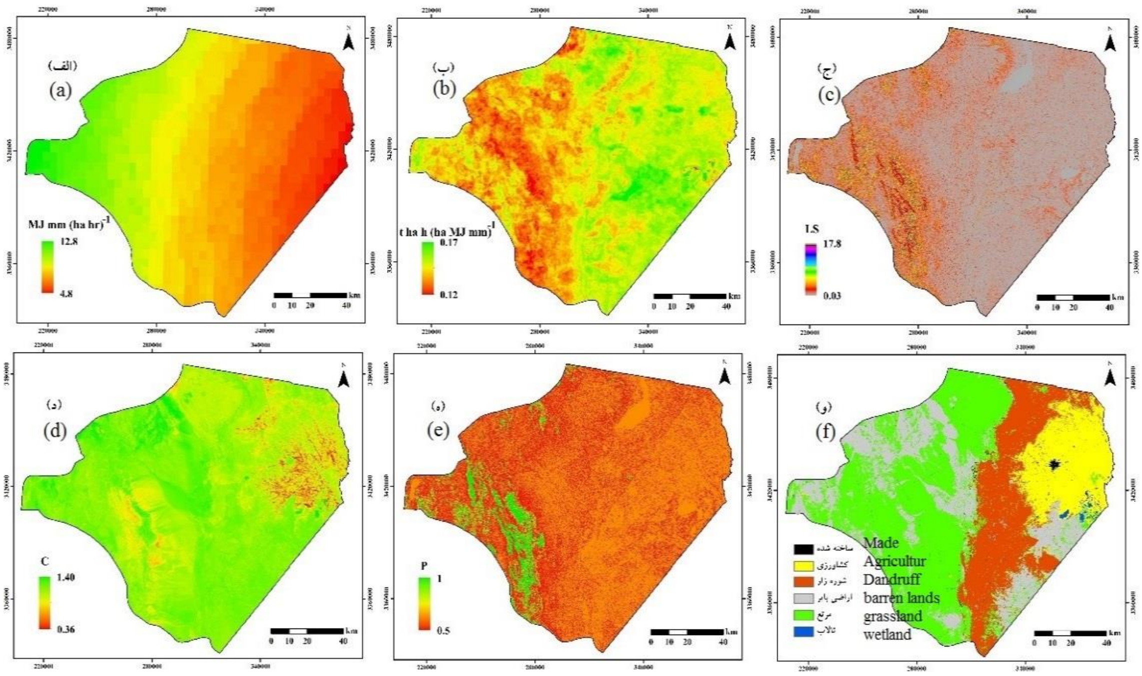
1 Tessellation
2 Geographically Weighted Regression

۱۷/۸، برای فاکتور C به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۰۳ و ۱/۴ و برای فاکتور P به ترتیب ۰/۵۹، ۰/۵ و ۱ محاسبه شد. این نتایج با دیگر مطالعات انجام شده در ایران تا حدود زیادی سنخیت دارد.

صادقی و همکاران(Sadeghi, Zabihi, Vafakhah & Hazbavi, 2017) میزان فاکتور R در دوره بازگشت ۵۰ ساله برای کل ایران را بین ۰/۷۹ تا ۷۸/۵ برآورد کردند. میرقائد و سوری(Mirghaed & Souri, 2023) مقدار فاکتورهای R، K و C را در حوضه آبخیز رودخانه شور در استان خوزستان، جنوب غرب ایران به ترتیب بین ۶/۳ تا ۱۰۰۶ ($MJ\ mm\ (ha\ hr)^{-1}$)، ۰/۰۹ تا ۰/۵ ($t\ ha\ hr\ (MJ\ ha\ mm)^{-1}$) و ۰ تا ۲/۱ برآورد کردند. احمدی میرقائد و همکاران(Ahmadi Mirghaed, Rahmani & Molla Aghajanzadeh, 2025) میانگین فاکتورهای R، K، LS و P برای حوضه آبخیز تجن در استان مازندران را به ترتیب ۳۰۷، ۰/۱۶، ۴۶ و ۰/۸۴ محاسبه کردند.

نقشه کاربری اراضی بر اساس تصاویر لندست ۸ و با استفاده از روش جنگل تصادفی در گوگل ارث انجین تهیه و طبقه‌بندی گردید (شکل ۳). در این رابطه، ضریب کاپا و صحت کلی به ترتیب ۰/۹۱ و ۹۴٪ بدست آمد که صحت و اعتبار طبقه‌بندی را تأیید می‌کند. نتایج نشان داد که ساخته‌شده‌ها، کشاورزی، شوره‌زار، اراضی بایر، مراتع و تالاب به ترتیب ۷۱۱۰، ۲۵۴۰۴۶، ۳۶۰۹۸۴، ۳۴۶۳۸۷، ۶۷۴۳۲۱ و ۲۹۸۴ هکتار از سطح منطقه را دربرگرفته‌اند.

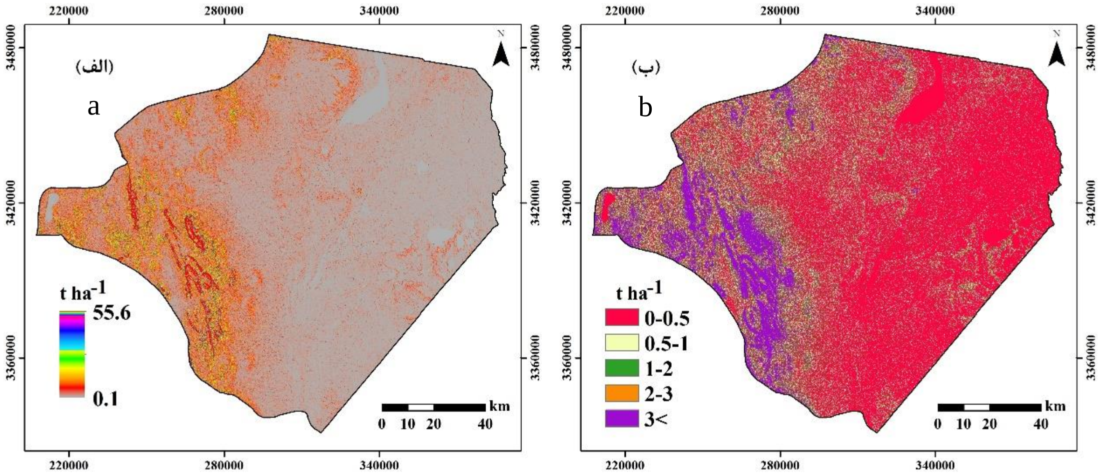
شکل ۴ نقشه فرسایش خاک بر اساس مدل اینوست را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن بود که فرسایش خاک در منطقه در مجموع معادل ۳/۴۱ میلیون تن در سال است که بین ۰/۱ تا ۵۵/۶ تن در هکتار متغیر می‌باشد و بطور میانگین معادل ۲/۰۷ تن در هکتار در سال برآورد گردید. این نتیجه با نتایج مطالعات انجام شده توسط درخشان بابائی و همکاران(Derakhshan Babaei et al., 2021) در حوضه آبخیز کن در استان تهران، احمدی میرقائد و همکاران(Ahmadi Mirghaed et al., 2018) در حوضه آبخیز گرگان، محمودی و نقشبندی (Mahmoodi & Naghshbandi, 2020) در حوضه آبخیز سد گاوشان و نژاد افضلی و همکاران (Nezhadafzali, Shahrokhi & Bayatani, 2019) در حوضه آبخیز دهکهان جنوب کرمان مطابقت دارد. جدول ۳ نیز نتایج مساحت اختصاص یافته به طبقات مختلف فرسایش خاک را نشان می‌دهد. مشخص گردید که طبقات فرسایش خیلی کم، کم، متوسط، شدید و خیلی شدید به ترتیب ۶۰، ۱۴، ۱۰، ۴ و ۱۲ درصد از سطح منطقه را شامل می‌شوند. طبقات فرسایش شدید و خیلی شدید اغلب در نیمه غربی منطقه وجود دارند که بیانگر پتانسیل بیشتر فرسایش خاک در این پهنه‌هاست. وجود شیب‌های تند، توپوگرافی متغیر، پوشش گیاهی پراکنده و فرسایندگی بیشتر باران عوامل مهمی در افزایش فرسایش خاک در بخش‌های غربی محسوب می‌شوند.



شکل ۳- نقشه‌های (الف) فرسایندگی باران، (ب) فرسایش‌پذیری خاک، (ج) طول و امتداد شیب، (د) عامل پوشش گیاهی، (ه) فاکتور مدیریت سرزمین و (و) کاربری اراضی

Fig.3. Maps of (a) rain erosion, (b) soil erodibility, (c) slope length and extension, (d) vegetation factor, (e) land management factor, and (f) land use.

نتایج نشان داد که میزان فرسایش سالانه در کاربری‌های ساخته شده، کشاورزی، شوره‌زار، اراضی بایر، مراتع و تالاب به ترتیب ۰/۴، ۰/۳، ۰/۴، ۲/۱، ۳/۶ و صفر تن در هکتار است(جدول ۴). بر این اساس، بیشترین وکمترین میزان فرسایش در کاربری‌های مراتع و تالاب اتفاق برآورد شد. بیشتر بودن میزان فرسایش در مراتع منطقه نسبت به کشاورزی و ساخته شده‌ها می‌تواند به این دلیل باشد که مراتع منطقه اغلب مناطق مرتفع و اراضی شیبدار را شامل می‌شوند در حالیکه کشاورزی و ساخته شده‌ها غالباً در بخش‌های هموار و مسطح منطقه توسعه یافتند. بعلاوه، کم تراکم بودن پوشش گیاهی مراتع نیز دلیلی دیگر در این باره محسوب می‌شود. این نتیجه با نتایج مطالعه انجام شده توسط درخشان بابائی و همکاران (Derakhshan Babaei et al., 2021) در حوضه آبخیز کن مطابقت دارد.



شکل ۴- نقشه‌های (الف) فرسایش خاک حاصل از مدل اینوست و (ب) طبقه‌بندی فرسایش خاک در پنج کلاس (خیلی کم: ۰/۵-۰، کم: ۱-۰/۵، متوسط: ۲-۱، زیاد: ۳-۲ و خیلی زیاد: ۳ <تن در هکتار)

Fig.4. Maps of (a) soil erosion resulting from the INVEST model and (b) soil erosion classification into five classes (very low: 0.5-0.5, low: 1-0.5, medium: 1-2, high: 2-3 and very high: >3 tons per hectare)

جدول ۳- میزان مساحت اختصاص‌یافته به هریک از کلاس‌های فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها

Table 3- The amount of area allocated to each of the soil erosion classes and habitat quality

فرسایش خاک Soil erosion				کیفیت زیستگاه‌ها Habitat quality			
طبقه Floor	میزان فرسایش Erosion rate ($t\ ha^{-1}y^{-1}$)	مساحت Area ha	مساحت Area ٪	طبقه Floor	ارزش زیستگاهی Habitat value	مساحت Area ha	مساحت Area ٪
خیلی کم Very little	0-0/5	993498	60	خیلی کم Very little	0-0/2	101389	6
کم Low	0/5-1	234465	14	کم Low	0/2-0/4	843041	51
متوسط Medium	1-2	157602	10	متوسط Medium	0/4-0/6	377842	23
شدید Severe	2-3	66567	4	شدید Severe	0/6-0/8	323489	20
خیلی شدید Very intense	3<	193700	12	خیلی شدید Very intense	0/8-1	0	0

در منطقه مطالعاتی بخش‌های غربی دارای بارندگی بیشتری هستند که باعث افزایش میزان فرسایندگی باران در این بخش‌ها شده است و با حرکت از سمت غرب به شرق منطقه از میزان آن کاسته می‌شود. میزان فرسایش‌پذیری خاک در کل منطقه به دلیل بیشتر بودن شن و رس نسبت به سیلت خاک، پائین است (K-factor <0.17). با این وجود، خاک‌های نیمه غربی منطقه از میزان فرسایش‌پذیری بیشتری نسبت به دیگر مناطق آن برخودار هستند در حالیکه کمترین میزان فرسایش‌پذیری خاک در بخش‌های شرقی مشاهده شد جایی که مناطق مسطح و هموار وجود دارند. بخش‌های غربی منطقه دارای توپوگرافی متنوع و شیب‌های تند هستند در حالیکه نیمه شرقی آن هموار و تقریباً مسطح است که باعث کاهش میزان دامنه و امتداد شیب در بخش‌های شرقی و افزایش آن در مناطق غربی شده است. بیشترین میزان فاکتورهای C و P نیز در بخش‌های غربی و کمترین میزان آن در قسمت‌های شرقی مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که روند تغییرپذیری مکانی فاکتورهای R، LS، C و P از شرق به غرب منطقه افزایشی است که تقریباً با روند تغییرات فرسایش خاک همسان است و افزایش آنها منجر به افزایش فرسایش خاک در منطقه می‌شود.

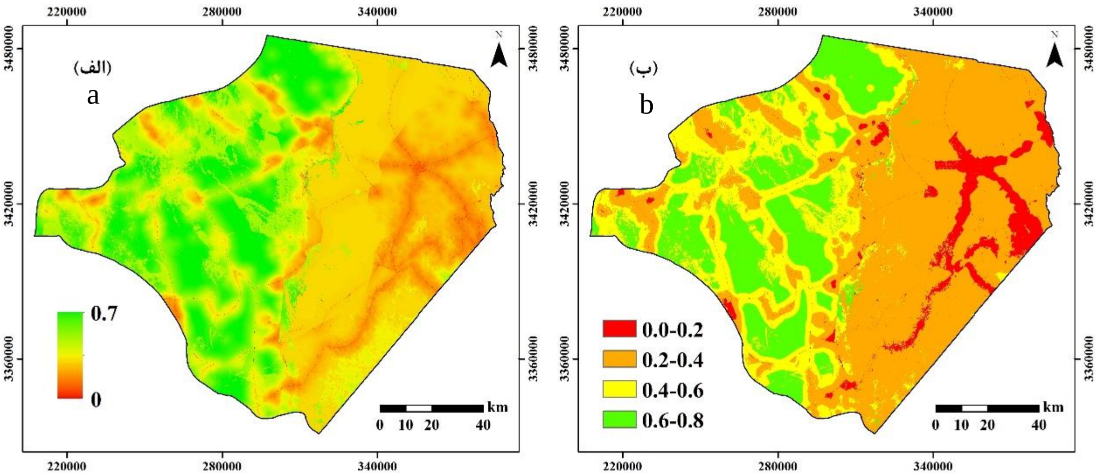
جدول ۴- میزان فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌ها برای هر کاربری

Table 4- Soil erosion rates and habitat quality for each land use

کاربری Usability	مساحت (ha) Area	فرسایش خاک Soil erosion t y^{-1}	فرسایش خاک Soil erosion t ha^{-1} y^{-1}	کیفیت زیستگاه‌ها Habitat quality
ساخته شده Made	7110	2671	0/4	0/1
کشاورزی Agriculture	254046	87448	0/3	0/24
شوره‌زار Salt marshes	360984	162210	0/4	0/29
اراضی بایر Barren lands	346387	719288	2/1	0/38
مراتع Meadows	674321	2421009	3/6	0/54
تالاب Wetlands	2984	0	0	0/19

شکل ۵ نتایج ارزیابی کیفیت زیستگاه‌های منطقه بر اساس مدل HQ-InVEST را نشان می‌دهد. معلوم گردید که زیستگاه‌های واقع در شمال و نیمه غربی منطقه از کیفیت بالاتری برخوردار هستند در حالیکه زیستگاه‌های شرقی و جنوب و مناطق نزدیک جاده‌ها و ساخته شده‌ها دارای کمترین مطلوبیت می‌باشند. کیفیت زیستگاه‌های منطقه در پنج کلاس مطلوبیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی گردید که نتایج آن در شکل ۵ و جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان داد که طبقات مذکور به ترتیب ۶، ۵۱، ۲۳، ۲۰ و صفر درصد از سطح منطقه را دربرگرفته‌اند. طبقات مطلوبیت خیلی کم و کم اغلب در مناطق

شرقی مشاهده می‌شوند جاییکه تراکم عناصر انسان‌ساخت و اراضی کشاورزی وجود دارند در حالیکه طبقات مطلوبیت متوسط و زیاد در نیمه غربی منطقه واقع شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که عناصر انسان‌ساخت و فعالیت‌های کشاورزی تهدیداتی جدی در راستای کاهش کیفیت زیستگاه‌های منطقه به شمار می‌روند. نتایج مطالعات انجام شده توسط احمدی میرقائد و سوری(Ahmadi Mirghaed & Souri, 2022) و هه و همکاران(He et al., 2017) نیز با نتایج مذکور مطابقت دارد.



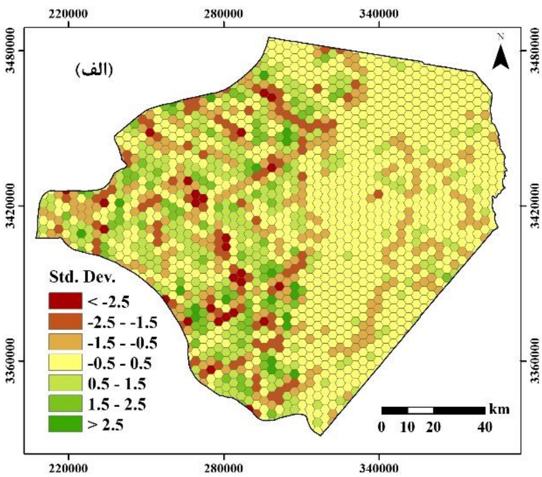
شکل ۵- نقشه‌های (الف) کیفیت زیستگاه‌ها حاصل از مدل اینوست و (ب) طبقه‌بندی کیفیت زیستگاه‌ها در چهار کلاس (خیلی کم: ۰/۲-۰، کم: ۰/۴-۰/۲، متوسط: ۰/۶-۰/۴ و زیاد: ۰/۸-۰/۶)

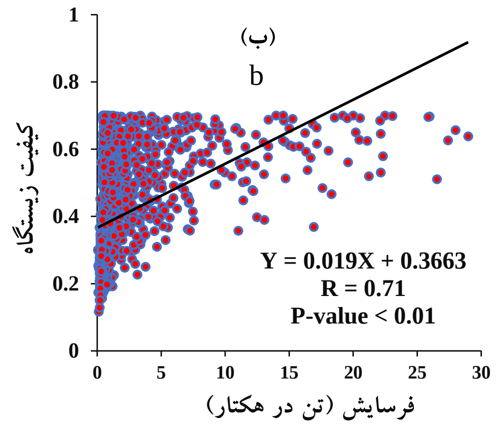
Fig.5. Maps of (a) habitat quality resulting from the INVEST model and (b) classification of habitat quality into four classes (very low: 0.0-2, low: 0.2-4, moderate: 0.4-6, and high: 0.6-8)

نتایج همچنین نشان داد که ارزش کیفیت زیستگاه‌ها در کاربری‌های ساخته شده، کشاورزی، شوره‌زار، اراضی بایر، مراتع و تالاب بطور میانگین به ترتیب ۰/۱، ۰/۲۴، ۰/۲۹، ۰/۳۸، ۰/۵۴ و ۰/۱۹ برآورد گردید که نشان می‌دهد زیستگاه‌ها در کاربری‌های مختلف منطقه دارای کیفیت کم تا متوسط هستند (جدول ۴). با این وجود، بیشترین و کمترین میزان کیفیت زیستگاه‌ها در کاربری های مراتع و ساخته شده‌ها مشاهده گردید. بیشتر بودن کیفیت زیستگاه‌ها در مراتع واقع در غرب منطقه می‌تواند به دلیل فاصله آنها از منابع تهدید و محدودیت دسترسی باشد. موریرا و همکاران(Moreira, Fonseca, Vergílio, Calado & Gil, 2018) نیز تأیید کردند که کیفیت زیستگاه‌های واقع در مناطق مرتفع به دلیل محدودیت دسترسی به آنها بالاتر است.

نتایج تحلیل آماری ارتباط بین کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک در شکل ۶ آورده شده است. آزمون هبستگی اسپیرمن نشان داد که یک رابطه مثبت و معنادار بین کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک در منطقه وجود دارد ($R=0.71$, $P\text{-value}<0.01$). بعلاوه نتایج GWR نیز همبستگی مکانی معنادار بین کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش را تأیید کرد ($R^2=0.91$, $P\text{-value}<0.01$). این نتایج نشان می‌دهد که الگوی مکانی

کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک در منطقه مطالعاتی تقریباً مشابه است بطوریکه زیستگاه‌های با کیفیت بالاتر در بخش غربی منطقه واقع شده اند ضمن آنکه همین بخش‌ها بخاطر ویژگی‌های توپوگرافی، خاک و اقلیمی موجود بطور طبیعی از پتانسیل فرسایش بیشتری برخوردار هستند. این در حالیست که در بخش شرقی منطقه پتانسیل فرسایش و هدررفت خاک کمتر است با وجود آنکه تراکم عناصر انسان‌ساخت و فعالیت‌های کشاورزی در این بخش وجود دارد.





شکل ۶- نتایج تحلیل آماری ارتباط بین کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک (الف) GWR: رگرسیون وزنی مکانی (R^2=0.91, P-value<0.01) و (ب) آزمون اسپیرمن

Fig.6. Results of statistical analysis of the relationship between habitat quality and soil erosion (a) GWR: spatial weighted regression (R2=0.91, P-value<0.01) and (b) Spearman test

جمع‌بندی

این مطالعه با هدف ارزیابی ارتباط بین فرسایش خاک و کیفیت زیستگاه‌های سیستان با استفاده از مدل اینوست صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که میزان فرسایش سالانه خاک در منطقه ۳/۴۱ تن در هکتار است و پهنه‌های غربی منطقه از پتانسیل بیشتری برای هدررفت خاک برخوردار هستند. بعلاوه، معلوم گردید که بطور کلی زیستگاه‌های منطقه بخاطر شرایط اکولوژیک و انسانی حاکم بر آنها از کیفیت قابل توجهی برخوردار نیستند. با این وجود، زیستگاه‌های بخش شرقی منطقه بخاطر تراکم بیشتر عناصر انسان‌ساخت و فعالیت‌های کشاورزی نسبت به نیمه غربی از کیفیت کمتری برخوردار هستند. نتایج مشخص کرد بخش غربی منطقه با وجود داشتن زیستگاه‌های مطلوبتر بخاطر ویژگی‌های اکولوژیکی حاکم بر آن از پتانسیل فرسایش و تلفات خاک بیشتری برخوردار است. نتایج این مطالعه علاوه بر ارائه اطلاعات مفید در مورد کیفیت زیستگاه‌ها و فرسایش خاک، ضرورت توجه بیشتر مدیران و برنامه‌ریزان را برای اتخاذ راهبردهای مناسب به منظور کاهش و کنترل فرسایش بخصوص در زیستگاه‌های با کیفیت مطلوبتر در منطقه مشخص می‌سازد.

References

Ahmadi Mirghaed, F. A., & Souri, B. (2022). Effect of landscape fragmentation on soil quality and ecosystem services in land use and landform types. *Environmental Earth Sciences*, *81*(12), 330. http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-732507/v1

Ahmadi Mirghaed, F., Rahmani, M., & Molla Aghajanzadeh, S. (2025). Quantification of water yield concerning land use and climate scenarios in the Tajan watershed, North of Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *22*(2), 849-862. http://dx.doi.org/10.1007/s13762-024-05749-8

Ahmadi Mirghaed, F., Souri, B., Mohammadzadeh, M., Salmanmahiny, A., & Mirkarimi, S. H. (2018). Evaluation of the relationship between soil erosion and landscape metrics across Gorgan Watershed in northern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, *190*, 1-14. http://dx.doi.org/10.1007/s10661-018-7040-5

Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International soil and Water Conservation Research*, *7*(3), 203-225. http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004

Aneseyee, A. B., Elias, E., Soromessa, T., & Feyisa, G. L. (2020a). Land use/land cover change effect on soil erosion and sediment delivery in the Winike watershed, Omo Gibe Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, *728*, 138776. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138776

Aneseyee, A. B., Noszczyk, T., Soromessa, T., & Elias, E. (2020b). The InVEST habitat quality model associated with land use/cover changes: A qualitative case study of the Winike Watershed in the Omo-Gibe Basin, Southwest Ethiopia. *Remote Sensing*, *12*(7), 1103. http://dx.doi.org/10.3390/rs12071103

Department of Environment Islamic Republic of Iran. [In Persian] https://rko.doe.ir/

Derakhshan Babaei, F., Nosrati, K., Mirghaed, F. A., & Egli, M. (2021). The interrelation between landform, land-use, erosion and soil quality in the Kan catchment of the Tehran province, central Iran. *Catena*, *204*, 105412. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2021.105412

Dou, X., Ma, X., Zhao, C., Li, J., Yan, Y., & Zhu, J. (2022). Risk assessment of soil erosion in Central Asia under global warming. *Catena*, *212*, 106056. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2022.106056

Gomiero, T. (2016). Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge. *Sustainability*, *8*(3), 281. http://dx.doi.org/10.3390/su8030281

Gong, J., Xie, Y., Cao, E., Huang, Q., & Li, H. (2019). Integration of InVEST-habitat quality model with landscape pattern indexes to assess mountain plant biodiversity change: A case study of Bailongjiang watershed in Gansu Province. *Journal of Geographical Sciences*, *29*, 1193-1210. http://dx.doi.org/10.1007/s11442-019-1653-7

He, J., Huang, J., & Li, C. (2017). The evaluation for the impact of land use change on habitat quality: A joint contribution of cellular automata scenario simulation and habitat quality assessment model. *Ecological Modelling*, *366*, 58-67. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.10.001

Lei, J., Chen, Y., Li, L., Chen, Z., Chen, X., Wu, T., & Li, Y. (2022). Spatiotemporal change of habitat quality in Hainan Island of China based on changes in land use. *Ecological Indicators, 145*, 109707. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109707

Li, H., & Shi, D. (2024). Spatio-temporal variation in soil erosion on sloping farmland based on the integrated valuation of ecosystem services and trade-offs model: A case study of Chongqing, southwest China. *Catena*, *236*, 107693. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2023.107693

Li, N., Zhang, Y., Wang, T., Li, J., Yang, J., & Luo, M. (2022). Have anthropogenic factors mitigated or intensified soil erosion over the past three decades in South China?. *Journal of Environmental Management*, *302*, 114093. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114093

Mahmoodi, M. A., & Naghshbandi, S. P. (2020). Estimation of Soil Erosion by RUSLE and Remote Sensing Data of Gawshan Dam Basin. *Water and Soil*, *33*(6), 845-856. [In Persian] https://doi.org/10.22067/jsw.v33i6.76446

Mirghaed, F. A., & Souri, B. (2023). Contribution of land use, soil properties and topographic features for providing of ecosystem services. *Ecological Engineering*, *189*, 106898. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106898

Moreira, M., Fonseca, C., Vergílio, M., Calado, H., & Gil, A. (2018). Spatial assessment of habitat conservation status in a Macaronesian island based on the InVEST model: A case study of Pico Island (Azores, Portugal). *Land Use Policy*, *78*, 637–649. http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.015

Nematollahi, S., Fakheran, S., Kienast, F., Pourmanafi, S., & Jafari, A. (2021). Assessing the Impact of Road Networks on Decreasing the Quality of Wildlife' Habitats Using the Vicinity Impact Index (Chaharmahal & Bakhtiari Province). *Desert Management*, *8*(16), 37-56. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jdmal.2021.243139

Nezhadafzali, K., Shahrokhi, M. R., & Bayatani, F. (2019). Assessment soil erosion using RUSLE model and identification the most effective factor in Dekhan watershed basin of southern Kerman. *Journal of Natural Environmental Hazards*, *8*(20), 21-38. [In Persian] https://doi.org/10.22111/jneh.2018.21894.1316

Obiahu, O. H., & Elias, E. (2020). Effect of land use land cover changes on the rate of soil erosion in the Upper Eyiohia river catchment of Afikpo North Area, Nigeria. *Environmental Challenges*, *1*, 100002. http://dx.doi.org/10.1016/j.envc.2020.100002

Pu, J., Shen, A., Liu, C., & Wen, B. (2024). Impacts of ecological land fragmentation on habitat quality in the Taihu Lake basin in Jiangsu Province, China. *Ecological Indicators*, *158*, 111611. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111611

Qiao, X., Li, Z., Lin, J., Wang, H., Zheng, S., & Yang, S. (2023). Assessing current and future soil erosion under changing land use based on InVEST and FLUS models in the Yihe River Basin, North China. *International Soil and Water Conservation Research*, *12*(2), 298-312. http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.07.001

Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, *157*(1-4), 287-306. http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceeding Of Erts-1 Symposium*, *NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1*. https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614

Sadeghi, S. H., Zabihi, M., Vafakhah, M., & Hazbavi, Z. (2017). Spatiotemporal mapping of rainfall erosivity index for different return periods in Iran. *Natural Hazards*, *87*, 35-56. http://dx.doi.org/10.1007/s11069-017-2752-3

Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., & Olwero, N. (2015). *InVEST Version 3.2. 0 User's Guide*. The Natural Capital Project. The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest/invest-downloads-data

Smith, D. D., & Wischmeier, W. H. (1962). Rainfall erosion. *Advances in Agronomy*, *14*, 109-148. http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60437-x

Sun, W., Shao, Q., Liu, J., & Zhai, J. (2014). Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. *Catena*, *121*, 151-163. http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.009

Toubal, A. K., Achite, M., Ouillon, S., & Dehni, A. (2018). Soil erodibility mapping using the RUSLE model to prioritize erosion control in the Wadi Sahouat basin, north-west of Algeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, *190*(4), 210. http://dx.doi.org/10.1007/s10661-018-6580-z

Van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., & Montanarella, L. (2000). *Soil erosion risk assessment in Europe*. Luxembourg: Official Publications of the European Communities.

Wei, Q., Abudureheman, M., Halike, A., Yao, K., Yao, L., Tang, H., & Tuheti, B. (2022). Temporal and spatial variation analysis of habitat quality on the PLUS-InVEST model for Ebinur Lake Basin, China. *Ecological Indicators*, *145*, 109632. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109632

Wu, L., Sun, C., & Fan, F. (2021). Estimating the Characteristic Spatiotemporal Variation in Habitat Quality Using the InVEST Model—A Case Study from Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area. *Remote Sensing*, *13*(5), 1008. http://dx.doi.org/10.3390/rs13051008

Zare, M., Panagopoulos, T., & Loures, L. (2017). Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed, Iran. *Land Use Policy*, *67*, 558–572. http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.028